

Rede de monitoramento fluvial

em cenários atuais e futuros

Mensagens-chave

- Os rios amazônicos ligam os Andes ao Atlântico, transportando água, sedimentos, minerais e nutrientes, ao mesmo tempo que sustentam a biodiversidade, a energia, os transportes e outras funções.
- Ao longo dos rios, o equilíbrio hídrico é o resultado de interações complexas entre a atmosfera e a superfície e entre a superfície e as águas subterrâneas.
- Atualmente, os países monitoram os rios usando estações hidrológicas e de qualidade da água, mas sem uma discussão regional abrangente sobre a densidade espaço-temporal dos dados coletados. No entanto, forças externas atuais e futuras, como atividades antropogênicas e mudanças climáticas, introduzem perturbações nos parâmetros fluviais medidos.
- Os países precisam abordar as seguintes questões: *Quais são os processos que modificam os parâmetros hidrológicos e de qualidade da água dos rios? Os projetos de monitoramento precisam considerar as interações entre a atmosfera e a superfície e entre a superfície e as águas subterrâneas? Quais são as medidas técnicas e regulamentações necessárias para monitorizar de forma otimizada os processos hidrológicos e de qualidade da água atuais e futuros?*

Rio Tigre



Processos hidrológicos complexos

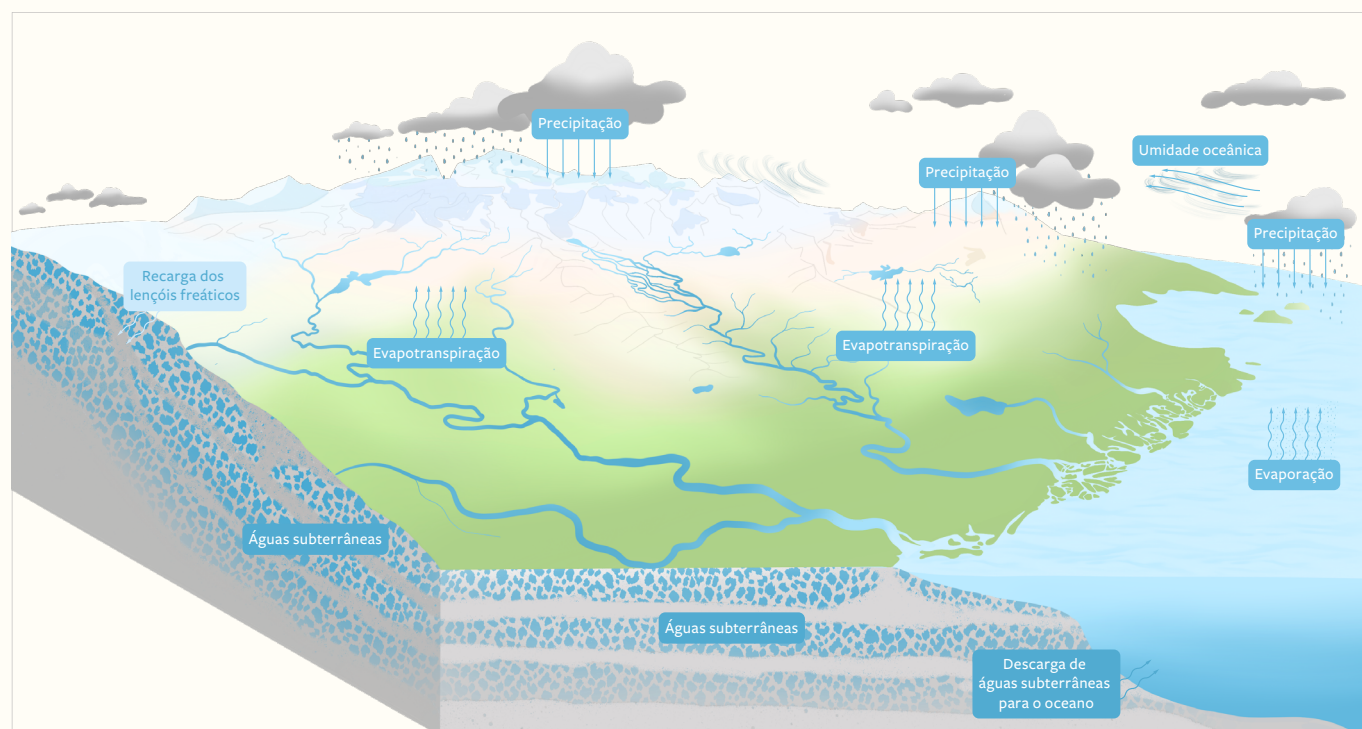
A Bacia do Rio Amazonas, a maior bacia hidrográfica do mundo, abrange oito países, desde os Andes até o Oceano Atlântico (~6,1 milhões de km²). Com uma vazão média anual de ~206.000–210.000 m³/s, ela é responsável por cerca de 20% da descarga de água doce global aos oceanos. A hidrologia da bacia reflete interações complexas entre altas taxas de precipitação com grande variabilidade espacial e temporal, influências oceânicas, densas florestas tropicais, topografia diversificada, extensas planícies aluviais e grandes mudanças sazonais no armazenamento e descarga de água doce.^{1,2} A alta precipitação na região resulta de interações complexas entre processos locais e de grande escala, notadamente o fornecimento de umidade oceânica e a evapotranspiração florestal (Fig. 1). Esses mecanismos regulam as chuvas, não apenas localmente, mas também regionalmente. Exemplos desse mecanismo são os “rios voadores” da Amazônia, que transportam umidade para além da bacia e sustentam a agricultura e a energia hidrelétrica em toda a América do Sul. A região também é globalmente significativa por sua rica biodiversidade³ e papel fundamental na regulação do clima, atuando como um importante sumidouro de carbono nas últimas décadas.⁴

A planície aluvial da Amazônia é a maior e mais biodiversa da Terra, com cerca de um sexto da diversidade de árvores amazônicas dependendo dos habitats da planície aluvial.⁵ O desmatamento contínuo (incluindo a degradação da planície aluvial), os incêndios

florestais e as mudanças climáticas ameaçam levar partes da floresta a um “ponto de não retorno”, com potencial savanização e transformação dessas regiões em fontes de carbono.⁴ Além disso, as mudanças antropogênicas (especialmente o desmatamento), combinadas com as alterações climáticas, já estão perturbando o ciclo da água e os parâmetros hidrológicos e de qualidade da água medidos, incluindo o transporte de sedimentos (Fig. 2). A longo prazo, essas mudanças podem comprometer a prestação de serviços ecossistêmicos essenciais pela região e afetar a economia e sociedade dentro e fora da bacia amazônica.

Vários estudos sugerem que as águas subterrâneas na bacia amazônica desempenham um papel importante nos ciclos hidrológicos e ecológicos,^{2,6,7} e influenciam amplamente os ecossistemas da floresta tropical e a variabilidade climática, especialmente durante a estação seca, onde a frequência crescente de secas sem precedentes indica um potencial ponto de não retorno.⁸ As secas perturbam a navegação e o transporte, a agricultura e o fornecimento de energia. Para compreender melhor esses efeitos e gerir esse recurso transfronteiriço, são necessários estudos mais direcionados em resposta às alterações climáticas e paisagísticas.⁷ O Projeto Sistema Aquífero Amazônico da OTCA (GEF 11108) aborda diretamente as interações entre as águas superficiais e subterrâneas.

Figura 1. Processos hidrológicos globais.²³



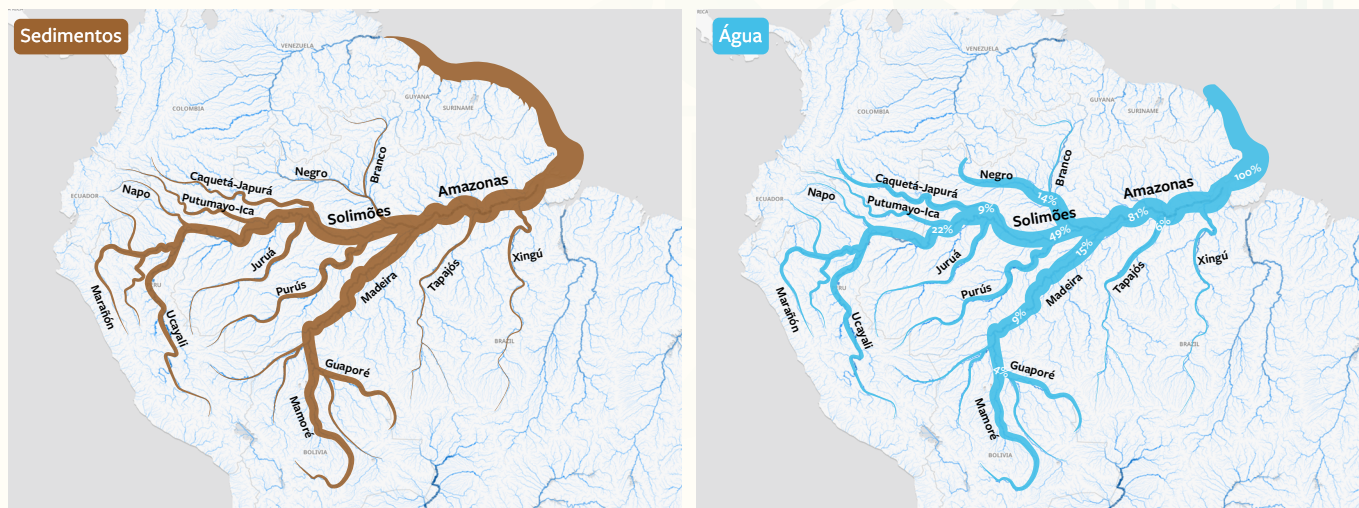


Figura 2. Processos fluviais.²²

Trajetórias das mudanças climáticas

As alterações climáticas estão intensificando o ciclo hidrológico global, alterando os padrões hidroclimáticos médios e extremos em todo o mundo. Na Amazônia, as temperaturas aumentaram cerca de 0,15 °C por década desde 1950, os regimes de precipitação estão mudando e a estação seca prolongou-se em cerca de 6,5 dias por década desde 1979 na Amazônia Meridional.⁹ Também se espera que as alterações climáticas aumentem a frequência, a intensidade e a extensão dos extremos hidrológicos na bacia amazônica. Há evidências observacionais de intensificação dos extremos na vazão dos rios, com tendências de diminuição das vazões mínimas no sul da Amazônia e aumento das vazões máximas em toda a região.¹⁰ Estudos de modelagem revelam tendências de declínio na disponibilidade futura de água (precipitação, escoamento, descarga), com impactos mais fortes em cenários de altas emissões e durante os meses de baixa vazão.^{11,12} Embora os impactos climáticos variem muito espacialmente, a Amazônia brasileira parece particularmente vulnerável ao declínio

na vazão anual dos rios.¹³ Reduções significativas na vazão anual e sazonal são projetadas para as sub-bacias do Madeira, Purus, Tapajós e Xingú,¹¹ com estimativas recentes sugerindo perdas de 14 a 20% na disponibilidade anual de água para Abacaxis, Javari e Trombetas, e de 11 a 14% para outras sub-bacias importantes sob emissões elevadas.¹² Em termos de extremos, os modelos climáticos projetam estações secas mais longas, redução das chuvas na estação seca e secas mais frequentes para a maior parte da bacia, exceto para a Amazônia ocidental, onde os eventos chuvosos podem aumentar e as secas podem diminuir.¹⁴

Trabalhos recentes investigaram o papel das contribuições das alterações climáticas e do desmatamento na Bacia Amazônica, destacando o papel importante do desmatamento na redução das precipitações na estação seca nos últimos 35 anos.¹⁵ Conforme observado na Fig. 3, os padrões de precipitação projetados para 2030 e 2050 implicam mudanças substanciais no escoamento e na quantidade de água nas estações de medição amazônicas. Portanto, é essencial um projeto de monitoramento coordenado regionalmente.



MUDANÇAS ANTROPOGÊNICAS

As pressões da mineração aluvial, agricultura, pecuária, desmatamento e exploração de petróleo na bacia amazônica aumentaram nos últimos anos, ameaçando os recursos hídricos e afetando comunidades ribeirinhas vulneráveis. As barragens hidrelétricas alteram os regimes de fluxo por meio de suas operações¹⁶ e podem modificar as condições de contorno da água e dos sedimentos se forem instaladas ao longo da transição entre os Andes e as planícies.¹⁷ Para minimizar danos adicionais, é necessário considerar diversos impactos ambientais em escala de bacia.

HIDRODEPENDÊNCIA: O CASO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO REGIONAL

O sistema hidrológico da Amazônia sustenta milhões de pessoas e protege a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. Essa dependência hídrica é uma relação complexa e recíproca, na qual a própria existência da floresta tropical depende do seu ciclo hidrológico interno. Os “rios voadores” dependem da evaporação maciça da vasta rede fluvial da Amazônia e da densa floresta, ilustrando essa interdependência. Anualmente, a bacia amazônica recicla uma quantidade estimada de 24% a 35% de sua água, que abastece geleiras tropicais, páramos e grandes cidades.¹⁸ Essas conexões transcendem

as fronteiras políticas e ligam diretamente a saúde da Amazônia à segurança alimentar e hídrica do continente sul-americano.

A conectividade da região é multifacetada, envolvendo dimensões longitudinais, laterais, verticais, temporais, bioculturais e sociobioeconômicas.¹⁸ Grande parte da diversidade biológica ocorre longitudinalmente (ao longo do rio) e lateralmente (do canal do rio à planície aluvial e paisagem circundante), criando corredores ecológicos naturais com condições ambientais específicas que determinam onde as espécies ocorrem e facilitam o seu movimento pela paisagem.¹⁹ Um exemplo dessa conectividade é a jornada migratória dos bagres-goliath (*Brachyplatystoma spp.*), que migram milhares de quilômetros entre as planícies amazônicas e os Andes, representando a mais longa migração estritamente em água doce conhecida.²⁰

A dependência das populações, economias e ecossistemas dos recursos hídricos é uma parte fundamental das conexões multidimensionais que existem dentro da bacia, onde as comunidades humanas e os sistemas naturais estão interligados com os seus rios. Os povos indígenas e as comunidades tradicionais dependem diretamente dos rios para a sua sobrevivência econômica, cultural e social. Portanto, quaisquer alterações na qualidade ou quantidade da água ameaçam diretamente a saúde e o modo de vida dessas comunidades.



Rio Juruena



Manaus

DESENVOLVIMENTO DE PROTOCOLOS PARA UM AMBIENTE EM MUDANÇA

Conforme observado na Fig. 3, a estação hidrométrica de Manacapuru registrou uma diminuição na elevação da superfície da água nos últimos anos, com implicações para o transporte fluvial, que podem se intensificar entre 2030 e 2050.

Dadas as mudanças heterogêneas na precipitação causadas pelo clima, a vazão ao longo dos rios também deverá variar. Em resposta, a OTCA, juntamente com os países membros, desenvolveu o módulo Rede de Monitoramento da Amazônia para analisar os regimes fluviais e sua correlação com fenômenos de mesoescala ou regionais, alinhados com os contextos de mudanças globais. De acordo com as normas da Organização Meteorológica Mundial (OMM), cuja experiência na padronização de procedimentos é reconhecida, a OTCA produziu um conjunto de recomendações sobre monitoramento fluvial. Essas recomendações foram aprovadas pela Rede Amazônica de Autoridades da Água (RADA)

como seus Protocolos Regionais para a Rede Hidrológica Amazônica (RHA) e a Rede de Qualidade da Água (RQA). Os protocolos abrangem: 1) Adaptação, instalação e operação das estações de monitoramento da RHA e da RQA, 2) análise de campo e coleta de amostras, 3) verificação, processamento, armazenamento, fornecimento, segurança e publicação de dados, 4) orientações sobre fluxos e responsabilidades para implementação, operação e publicação dos dados da RHA e da RCA. Esses protocolos concluem com a indicação de processos para integrar os dados de cada país e sua relação com as bases de dados interoperáveis do Observatório Regional da Amazônia (ORA) no contexto dos recursos hídricos regionais. Isso permite o planejamento de cenários em escalas mesogeográficas e temporais, além de apoiar a gestão sustentável e cooperativa dos rios transfronteiriços. Essa iniciativa fortalecerá o monitoramento tanto das condições atuais quanto dos cenários futuros. Essa iniciativa fortalecerá o monitoramento das condições hidroclimáticas atuais e futuras.

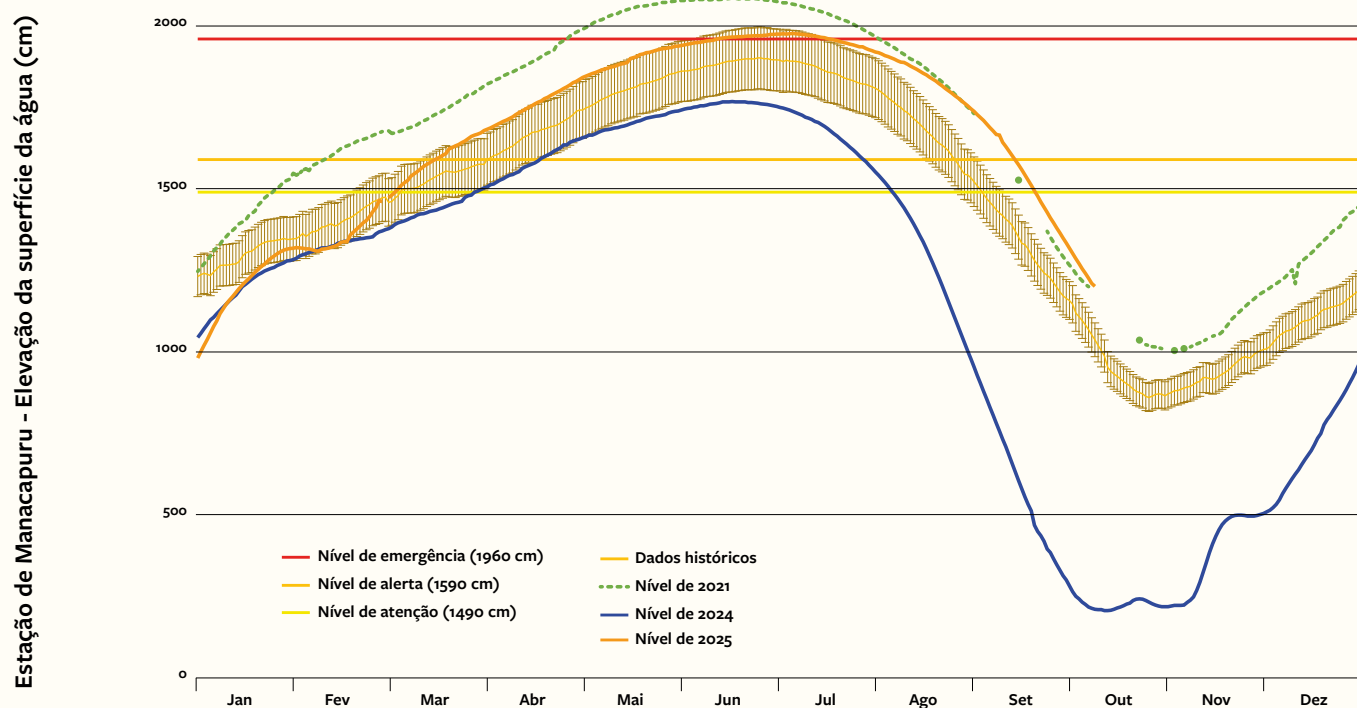


Figura 3. Elevação da superfície da água na estação de Manacapuru

Recomendações

REFORÇAR A ADAPTAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS ATRAVÉS DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO MELHORADO

Espera-se que uma adaptação climática cuidadosamente planejada ajude os países a mitigar os danos associados às alterações climáticas. Os países devem contribuir para o desenvolvimento de um sistema aprimorado de monitoramento das bacias hidrográficas para: (1) melhorar a detecção de tendências climáticas, permitindo respostas de adaptação mais eficientes; (2) compreender melhor os recursos hídricos disponíveis, o que, por sua vez, melhorará os sistemas de gestão da água; (3) tomar decisões mais informadas em matéria de alocação de água, projetos de infraestruturas, agricultura e/ou planejamento energético; (4) melhorar os sistemas de alerta hidrometeorológico em tempo real para minimizar as perdas econômicas durante eventos extremos de inundações/secas; (5) desenvolver um sistema de modelagem hidrológica transfronteiriça que avalie a resposta dos rios às mudanças globais; (6) complementar as medições in situ com estimativas de sensoriamento remoto de parâmetros hidrológicos e de qualidade da água; e (7) incluir uma rede de monitoramento das águas subterrâneas e suas correlações com os processos superficiais.

SUSTENTAR A MITIGAÇÃO CLIMÁTICA

O compromisso regional contínuo com a mitigação climática é vital, uma vez que se prevê que os impactos climáticos nos recursos hídricos da Amazônia se intensifiquem com níveis mais elevados de aquecimento global. A longo prazo, ações ambiciosas aumentam as chances de limitar o aquecimento global a menos de 2 °C, reduzindo o risco de impactos climáticos graves e melhorando a eficácia da adaptação climática do setor hídrico. Nesse sentido, as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e as Estratégias de Desenvolvimento de Baixas Emissões a Longo Prazo (LT-LEDS) são ferramentas fundamentais para promover uma mitigação ambiciosa. Além disso, o controle do desmatamento é vital para preservar os serviços ecossistêmicos da Amazônia, incluindo o abastecimento de água doce em toda a bacia hidrográfica e em toda a América do Sul.

PROJETAR O SISTEMA REGIONAL EM TORNO DA CONECTIVIDADE E DOS PROCESSOS DE ACOPLAMENTO

O monitoramento regional deve ser projetado de forma a incluir as interações entre as águas superficiais e subterrâneas, bem como a conectividade entre os Andes e o Atlântico (abrangendo Guiana, Suriname e Venezuela).



Tributário do Rio Amazonas

Trajetórias amazônicas

Estações hidrológicas e de qualidade da água estão localizadas em toda a bacia amazônica (Fig. 4). Algumas das estações de medição estão localizadas em regiões onde são projetadas variações positivas e negativas nos padrões de precipitação para as trajetórias climáticas

da Amazônia em 2030 e 2050. A precipitação se converte em escoamento e, em seguida, em vazão ao longo dos rios. Dependendo das trajetórias climáticas, algumas estações poderão detectar aumento ou diminuição na magnitude dos parâmetros hidrológicos.

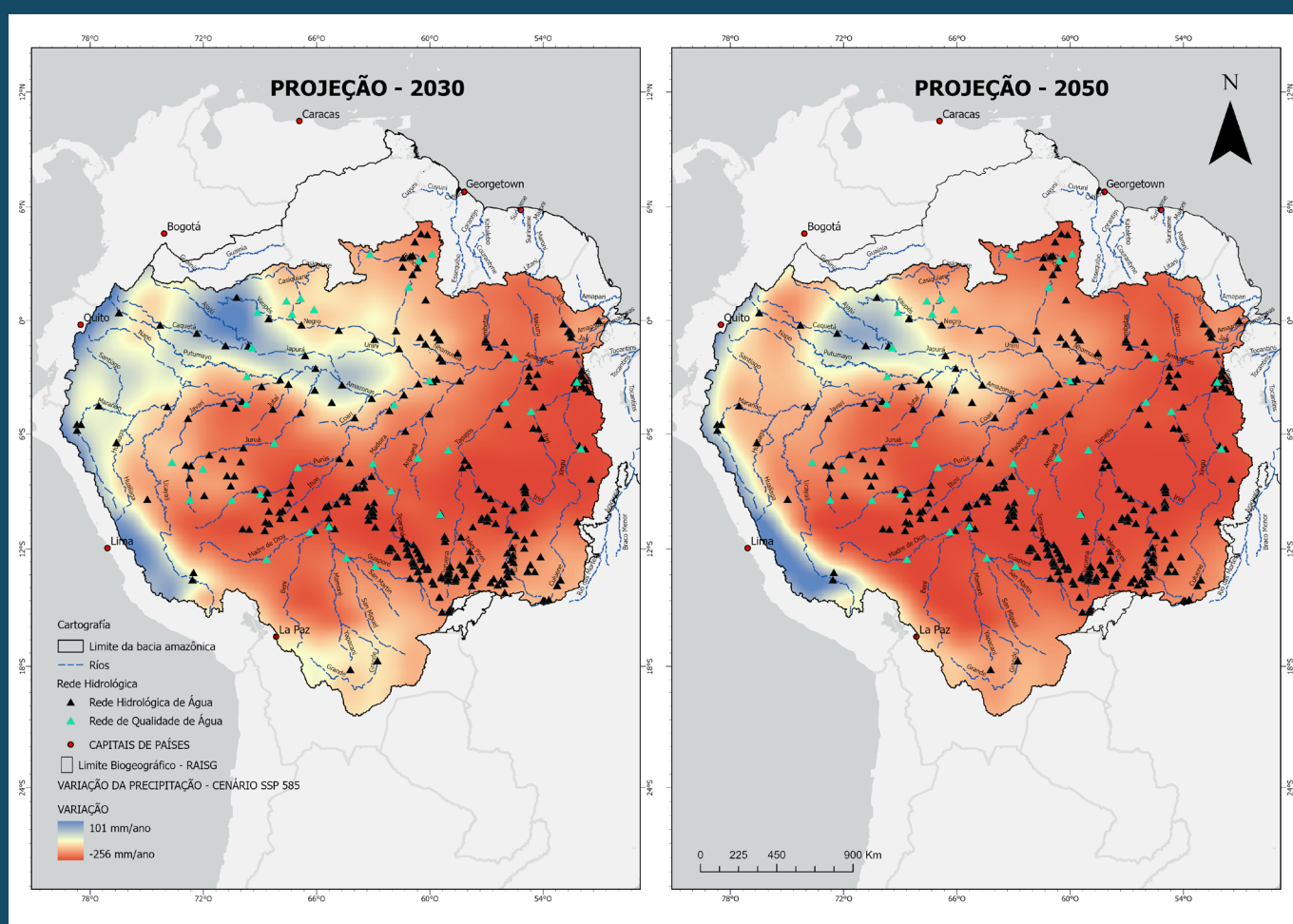


Figura 4. Média do conjunto multimodelo CMIP6 da precipitação (mm/ano) com alteração projetada em 2030 e 2050 para o cenário SSP-585 (alta emissão) e rede do rio Amazonas (hidrologia e qualidade da água).

Referências

- 1 Siqueira et al. (2018). Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4815–4842.
- 2 Fassoni-Andrade et al. (2021). Amazon Hydrology from Space: scientific advances and future challenges. *Reviews of Geophysics*, 59(4).
- 3 De Almeida Mereles et al. (2025). Distribution of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in surface waters of the Amazon basin: A basis for studies on provenance. *The Science of the Total Environment*, 965, 178630.
- 4 Brienen et al. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519(7543), 344–348.
- 5 Householder et al. (2024). One sixth of Amazonian tree diversity is dependent on river floodplains. *Nature Ecology & Evolution*, 8(5), 901–911.
- 6 Caldas et al. (2022). Identifying the current and future status of freshwater connectivity corridors in the Amazon Basin. *Conservation Science and Practice*, 5(1).
- 7 Frappart et al. (2018). The spatio-temporal variability of groundwater storage in the Amazon River Basin. *Advances in Water Resources*, 124, 41–52.
- 8 Flores et al. (2024). Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, 626(7999), 555–564.
- 9 Marengo et al. (2018). Changes in climate and land use over the Amazon Region: Current and future variability and trends. *Frontiers in Earth Science*, 6.
- 10 Chagas et al. (2022). Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nature Communications*, 13(1), 5136.
- 11 Brêda et al. (2020). Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, 159(4), 503–522.
- 12 Santos da Silva et al. (2026). A Hydrological Model to Assess Current and Future Freshwater Availability: Application to Climate Change Impacts in the Amazon River Basin through Mid-Century. *Journal of Hydrology*, 664(B), 134473.
- 13 Almeida et al. (2021). Climate change may impair electricity generation and economic viability of future Amazon hydropower. *Global Environmental Change*, 71, 102383.
- 14 Duffy et al. (2015). Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(43), 13172–13177.
- 15 Franco et al. (2025). How climate change and deforestation interact in the transformation of the Amazon rainforest. *Nature Communications*, 16(1), 7944.
- 16 Hazas et al. (2022). Drought conditions enhance groundwater table fluctuations caused by hydropower plant management. *Water Resources Research*, 58(10).
- 17 Abad et al. (2024). River geomorphology and fish diversity around the Manseriche Gorge, the last ANDEAN crossing is in peril. *Water Resources Research*, 60(11).
- 18 Science Panel for the Amazon. (2024). Policy Brief: Conserving the Amazon's Freshwater Ecosystems' Health and Connectivity.
- 19 Macedo et al. (2015). State of the Amazon: Freshwater Connectivity and Ecosystem Health. WWF Living Amazon Initiative.
- 20 Barthem et al. (2017). Goliath catfish spawning in the far western Amazon confirmed by the distribution of mature adults, drifting larvae and migrating juveniles. *Scientific Reports*, 7(1), 41784.
- 21 Vilela, I. (2025). Global Climate Connection. Atmosphere, Ocean, and Amazon. *Amazon Trajectories No. 2*. [Policy Brief]. Amazon Cooperation Treaty Organization (ACTO).
- 22 Goulding et al. (2003). The Smithsonian Atlas of the Amazon. *Smithsonian Books*.
- 23 Corson-Dosch et al. (2023). The water cycle. *General Information Product*. U.S. Geological Survey.

SUGESTÃO DE CITAÇÃO

Abad, J. et al. (2025). Rede de Monitoramento fluvial em cenários atuais e futuros *Trajetórias Amazônicas nº 7*. [Policy Brief]. Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA). Disponível em <https://www.oraotca.org>

AVISO DE RESPONSABILIDADE

Este documento constitui uma compilação técnico-informativa sobre um tema prioritário para a Organização do Tratado de Cooperação Amazônica (OTCA), elaborada com o propósito de subsidiar e enriquecer o debate regional. As opiniões, análises e interpretações aqui apresentadas correspondem exclusivamente a seus autores. Seu conteúdo não reflete necessariamente a posição oficial da OTCA nem de seus Países Membros. As informações apresentadas passaram por curadoria técnica que respalda sua credibilidade.

AUTORES

Jorge D. Abad (Consultor, Banco Mundial)
Sílvia Regina Santos da Silva (Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Maryland)
Gabriela Flores (ASL, Banco Mundial)
Naziano Filizola (Universidade Federal do Amazonas)

COORDENAÇÃO CIENTÍFICA ORA

Arnaldo Carneiro
arnaldo.carneiro@otca.org

COORDENAÇÃO EDITORIAL ORA

Paula Drummond

PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA E MODELAGEM ORA

Isabelle Vilela, Maycon Castro, Maria Fernanda Ribeiro, Mathias Alvarez, Rafaela Cipriano

DESIGN, DIAGRAMAÇÃO E ILUSTRAÇÕES

Patrícia Sardá | Estúdio Abanico

FOTOGRAFIAS

Rafa Neddermeyer/Agência Brasil, Sergio Amaral/OTCA, Mark Fox, Gino Tuesta, Adriano Gambarini

OBSERVATÓRIO REGIONAL AMAZÔNICO (ORA)

É o centro de referência da OTCA que integra dados, testa inovações e dissemina informações apoiando os países membros na cooperação e na tomada de decisões.

ORGANIZAÇÃO DO TRATADO DE COOPERAÇÃO AMAZÔNICA (OTCA)

A OTCA é uma organização intergovernamental, formada por oito países amazônicos: Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Guiana, Peru, Suriname e Venezuela, que assinaram o Tratado de Cooperação Amazônica, tornando-se o único bloco socioambiental da América Latina.

OTCA / ORA

SEPN 510, Bloco A, 3º andar – Asa Norte | Brasília (DF), Brasil, CEP: 70.750-52
ora@otca.org | <https://www.oraotca.org/>

